実験トランジスタ・アンプ設計講座

黒田 徹

●実用技術編

第10章　回路シミュレータ SPICE 入門（27）

超低ひずみ率の EL 34 PP カスコード・パワー・アンプ

前回は，EL 34のカソードを2 SD 669 Aで電流ドライブしたシングル・パワー・アンプ（第1図）をご紹介しました．15.6 dBのオーバオール NFBをかけた状態での出力＝6.6 W（R_L＝8 Ω）において，10 kHzのひずみ率が，

・第2調波ひずみ率＝0.0039%
・第3調波ひずみ率＝0.0012%

とシミュレーションされました．

真空管アンプとしては驚くべき低ひずみですが，2次ひずみをキャンセルすればさらにひずみ率が減少するはずです．そこで今回は，プッシュプル方式に改めたアンプをご紹介します．

EL 34 PP の回路図

はじめに第2図のアンプをシミュレーションしてみましょう．B電源電圧，EL 34のスクリーン・グリッド電圧，カソード電流は第1図のアンプと同じで，A級PP動作です．

オーバオールの負帰還はかけていません．下側の OPA 2604の非反転入力端子に，ゲイン＝−1倍のバッファで位相反転した入力信号を加えています．なお，このバッファ LAP 1はアナログ・ビヘイビア・モデルです．

(1)　使用オペアンプ

前回は OPA 604を用いましたが，今回は2個入りの OPA 2604です．OPA 2604のデバイス・モデルはバーブラウン社で作成された純正マクロモデル OPA 2604/BBと OPA 2604 E/BBがあります．これらは下記の Webサイト，

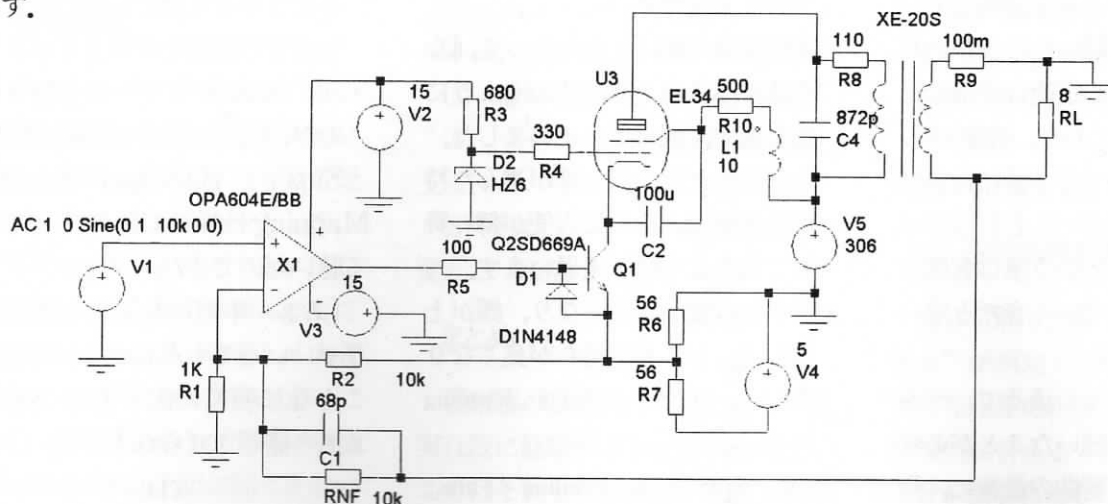
http://www.orcadpcb.com/pspice/models.asp?bc=F

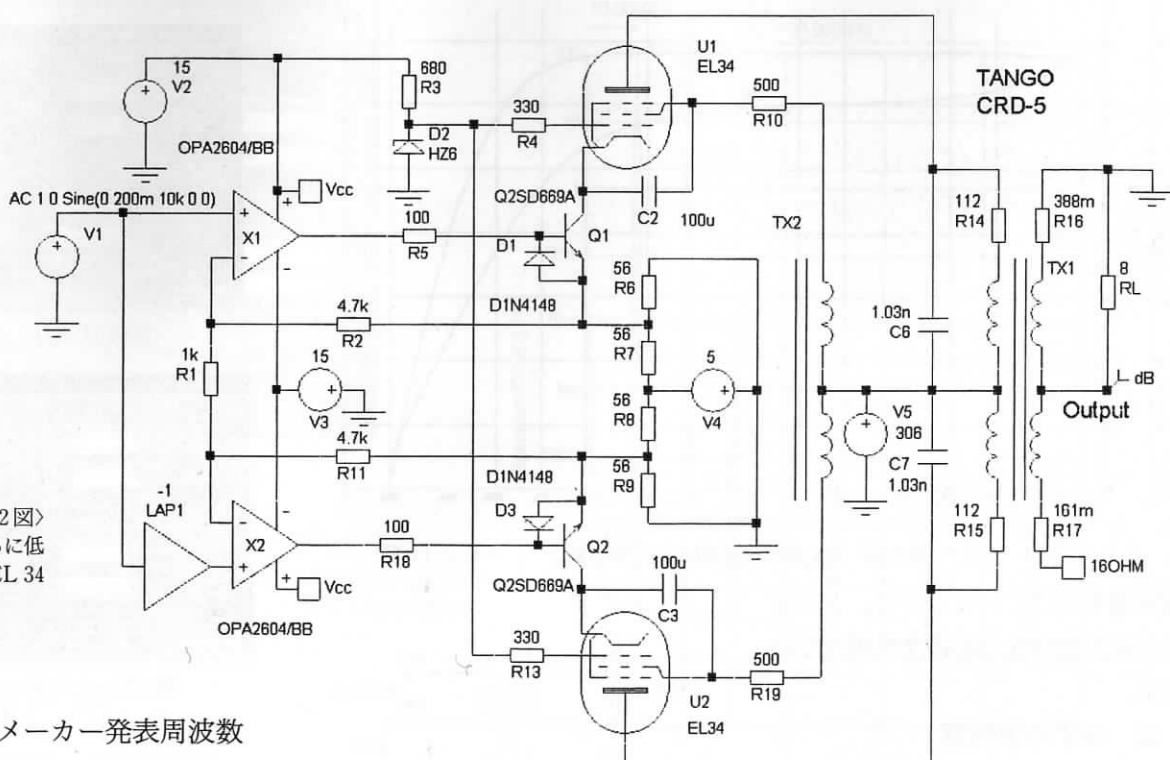
にある burr_brn.libというモデル・ライブラリ・ファイルに含まれています．このファイルは無条件でダウンロードできます．

OPA 2604 E/BBはオペアンプの内部雑音や入力容量も考慮した強化モデルですが，回路規模が大きいため，2個使うと SIMetrix 評価版の規模制限を越えてしまいます．

今回は雑音特性をシミュレーションしないので，標準モデルの OPA 2604/BBを使います．

(2)　出力トランス

1次インピーダンスが5 kΩのタンゴ CRD-5を用いることにしま

〈第1図〉前号で紹介したカソード電流駆動の EL 34シングル・アンプ回路

〈第2図〉
第1図の回路のさらに低ひずみ化を狙った EL 34 PP アンプの回路図

す．CRD-5 のメーカー発表周波数特性を第3図に示します．ここでは，CRD-5 を第4図の等価回路（1次側換算モデル）のトランスでシミュレーションします．

第4図のトランスの周波数特性を第5図に示します．200 kHz 以上でメーカー発表の特性（第3図）とやや違いがあります．

第2図の回路にトランスを配置するには，回路図ウインドウのメニューから，[Place]→[Passives]→[Ideal Transformer…] をクリックします．トランスの属性は第6図のように設定します．図の項目 [Define Turns Ratio] における Prim. 2，Sec. 1，Sec. 2 は巻線を表します（第7図）．

詳細は，2004年4月号 p. 148〜150 を参照してください．

〈第3図〉 CRD-5の周波数，位相，インピーダンス特性

〈第4図〉 CRD-5出力トランスの等価回路

(3) EL 34 の SG 端子に接続するチョーク・コイル

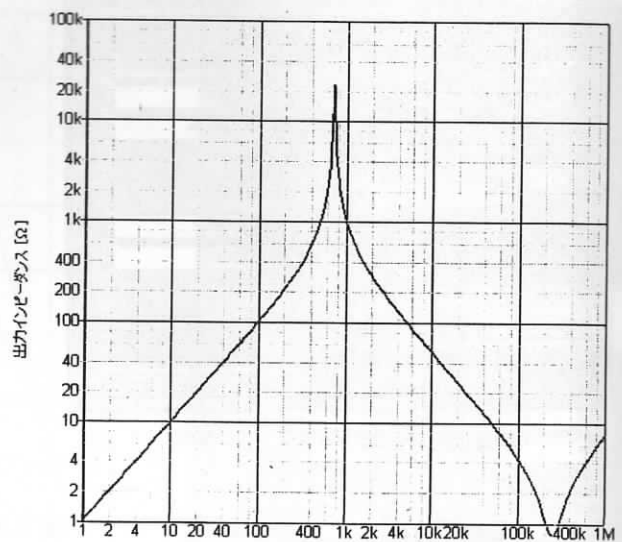
EL 34 のスクリーン・グリッドは交流的にカソードに短絡する必要があるので，チョーク・コイル TX 2 で B 電源から交流的に絶縁します．ここでは中点タップつきコイルを用いました．なお，シミュレーションには，理想トランスを用います．

すなわち，回路図ウィンドウのメニューから [Place]→[Passives]→[Ideal Transformer…] をクリックし，現われたダイアログボックスを第8図のように編集します．# Secondaries（2次巻線の個数）を0にセットすると，チョーク・コイルになります．インダクタンスは 10 H とします．EL 34 の両 SG 間の負荷インダクタンスは4倍の 40 H になります．

特性のシミュレーション

(1) 周波数特性

第2図のアンプの AC 解析結果を第9図に示します．1 kHz のゲインは 37.4 dB です．オーバオールの

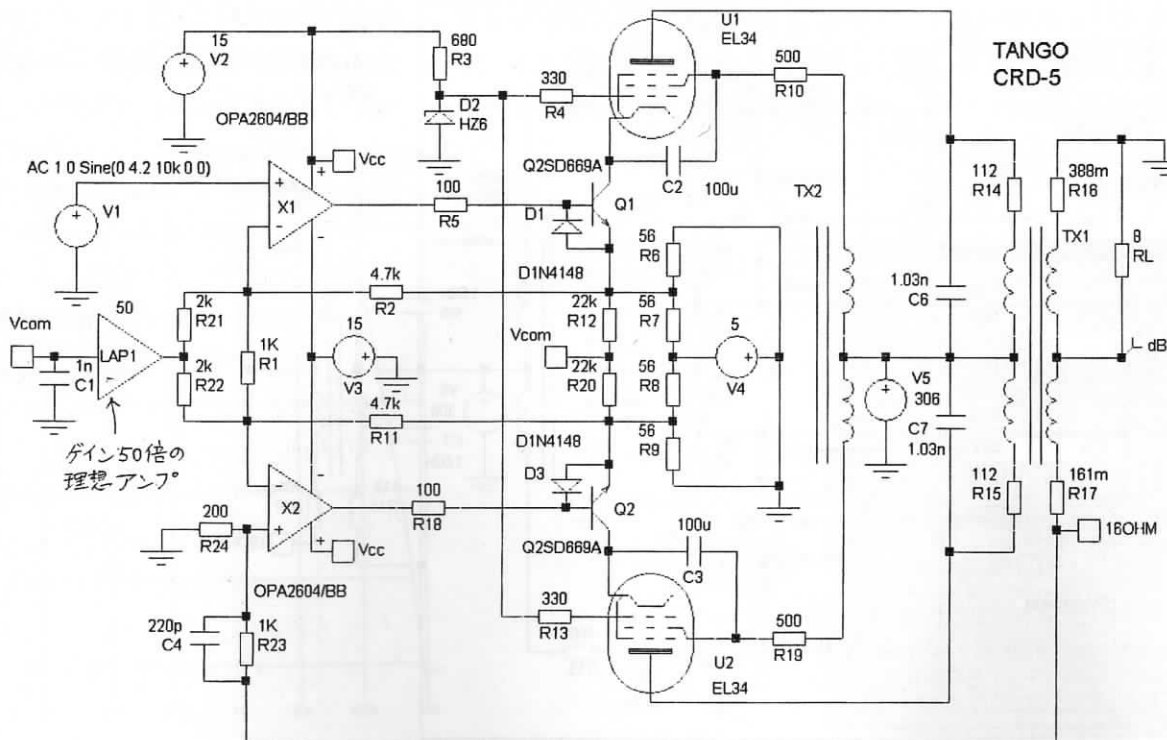
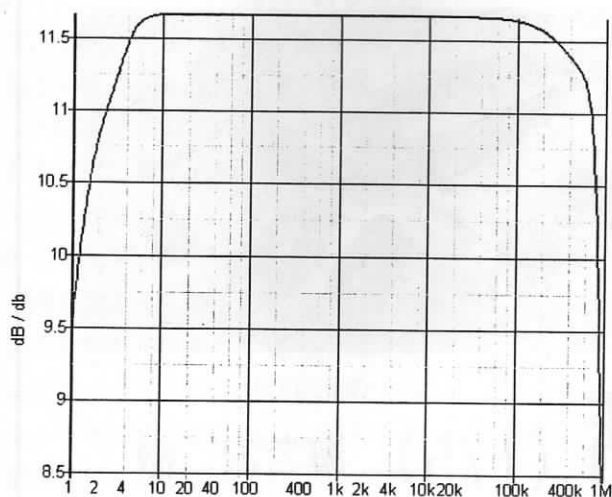
〈第 14 図〉 第 13 図実用回路のフーリエ解析結果

〈第 15 図〉 第 13 図の実用回路の出力インピーダンス特性

(−110 dBc) にすぎません.

⑶ **出力インピーダンス**

第 2 図と**第 3 図**のアンプの出力段は 2 SD 669 A と EL 34 のカスコード接続になっているので，出力インピーダンスが極めて高くなっています．**第 13 図**のアンプの出力インピーダンス対周波数特性を**第 15 図**に示します．これは 1 次および 2 次の負荷抵抗を開放したときの出力トランスのインピーダンス特性そのものです．数 100 Hz 以下においてインピーダンスが周波数に比例するのは，1 次インダクタンスに起因します．

また，数 kHz 以上における出力インピーダンスの低下は，巻線容量に起因します．700 Hz 付近のピークは 1 次インダクタンスと 1 次巻線容量の並列共振です．鋭い共振峰は巻線抵抗が小さいことを表します．300 kHz 以上で出力インピーダンスが増加するのは，リーケージ・インダクタンスに起因します．

なお，700 Hz 付近の共振峰はスピーカを接続すれば消失します．**第 2 図**と**第 13 図**のアンプは理想的な電流駆動アンプになっています．

〈第 16 図〉 さらに低ひずみを狙ってオーバオール NFB と同相 NFB をかけた回路

〈第 17 図〉第 16 図の回路の周波数特性

〈第 18 図〉第 16 図の回路フーリエ解析結果

オーバオールの負帰還と同相負帰還をかける

第 2 図と**第 13 図**のアンプは，スピーカを接続したとき，スピーカのインピーダンス特性と相似の周波数特性になります．一般的にスピーカのインピーダンスはオーディオ帯域において大きく変動するので，音圧対周波数特性が大きく乱れます．

この問題を回避するにはオーバオールの電圧負帰還をかける必要があります．**第 16 図**のアンプは，下側のオペアンプの非反転入力端子にオーバオールの負帰還を戻しています．

そうすると，大きな同相入力電圧が発生し，AC バランスが完全に崩れてしまいます．

そこで，**第 16 図**のアンプは同相負帰還を併用しています．すなわち Q 1 と Q 2 のエミッタ電圧を R_{12} と R_{20} で分圧して同相信号電圧を検出し，ゲイン＝50 倍の理想アンプで増幅し，R_{21} と R_{22} で両オペアンプの反転入力端子にフィードバックしています．理想アンプの入力端子～GND 間に挿入した C_1＝1 nF は同相負帰還を安定にかけるための位相補償容量です．

〈第 19 図〉
第 16 図の回路の出力インピーダンス特性

(1) 周波数特性

第 16 図のアンプの周波数特性を**第 17 図**に示します．低域は 10 Hz までフラットです．

(2) ひずみ率特性

第 16 図のアンプのフーリエ解析結果を**第 18 図**に示します．

基本波成分（10 kHz）：16.07 V

3 次調波成分（30 kHz）：258 μV

となっています．すなわち，

3 次調波ひずみ率＝0.0016％

です．2 次調波ひずみ率は 0.001％を切っています．

(3) 出力インピーダンス

第 16 図のアンプの出力インピーダンス対周波数特性を**第 19 図**に示します．20 Hz～20 kHz の範囲で約 0.85 Ω です．